

На правах рукописи

МАРУШКО МИХАИЛ ВИКТОРОВИЧ

**ТЕРМОВАКУУМИРОВАННЫЙ ЯЧЕИСТЫЙ БЕТОН
НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент
Погорелова Инна Александровна

Официальные оппоненты

Ильина Лилия Владимировна,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный архитектурно-
строительный университет (Сибстрин)»,
директор института цифровых
и инженерных технологий

Павленко Наталья Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
ФГБУ «Научно-исследовательский
институт строительной физики Российской
академии архитектуры и строительных
наук», старший научный сотрудник

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Томский государственный
архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «19» декабря 2025 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214 ГУК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте https://gos_att.bstu.ru/dis/Marushko

Автореферат разослан «24» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Суслов Денис Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. На сегодняшний день развитие строительного материаловедения направлено на повышение качества, надежности, экологичности и снижение себестоимости материалов и изделий. Одним из приоритетных направлений является производство неавтоклавного энергоэффективного ячеистого бетона с высокими физико-механическими характеристиками, потребность в котором возрастают в связи с постоянным развитием строительного комплекса, в том числе увеличением объемов возводимого индивидуального жилищного строительства.

Важными и актуальными вопросами производства неавтоклавного ячеистого бетона, в котором в качестве заполнителя используется вторичный продукт промышленности – зола-уноса ГРЭС, являются способы создания качественной пористой структуры, повышение прочности и морозостойкости, снижения средней плотности, теплопроводности и водопоглощения. Производство неавтоклавного ячеистого бетона с требуемыми физико-механическими характеристиками позволяет повысить технико-экономические показатели и использовать отходы промышленности, улучшая экологию окружающей среды, а также энергоэффективность зданий, снизив затраты на отопление и кондиционирование.

Работа выполнена в рамках: Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова до 2021 года, НИР А54/20; Программы развития БГТУ им. В.Г. Шухова «Приоритет 2030» на 2021-2030 гг., № Пр-10/22; с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Степень разработанности темы. В отечественной и зарубежной литературе достаточно подробно освещены аспекты и возможные способы повышения качества неавтоклавного ячеистого бетона. Исследования затрагивают вопросы совершенствования приемов, изменений условий и режимов формирования пористой структуры ячеистого бетона и технологий изготовления изделий на его основе, а также влияния рецептурных и технологических факторов изготовления ячеистого бетона. Мало изученными, но актуальными являются: использование отходов промышленности вместо дорогостоящего кварцевого песка; использование воздухововлекающих добавок в качестве порообразователей; применение температурного фактора, как важной составляющей вакуумированной технологии для изготовления неавтоклавного ячеистого бетона, и внедрения термовакуумирования для управления процессами вспучивания поризованной смеси с получением улучшенной поровой структуры и свойств ячеистых бетонов.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение ячеистого бетона неавтоклавного твердения с улучшенными физико-механическими характеристиками за счет термовакуумирования смеси в процессе формирования пористой структуры материала.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- изучение влияния вакуумирования как способа создания ячеистой структуры бетона на начальном этапе его твердения при термовакуумировании поризованной смеси;
- разработка принципов управления процессами вспучивания поризованных смесей термовакуумированием для получения улучшенной поровой структуры ячеистого бетона;

– исследование объемного содержания фаз (твердой, жидкой и газообразной) в процессах, протекающих в ячеистобетонной смеси при формировании структуры;

– разработка составов термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с учетом рецептурно-технологических факторов и изучение их физико-механических характеристик;

– подготовка нормативной документации на производство и применение термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения; апробация результатов исследований в производственных условиях и оценка их технико-экономической эффективности.

Научная новизна работы. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с однородной пористой структурой и улучшенными физико-механическими характеристиками за счет совместного применения температурного фактора и вакуумирования для управления кинетикой газовыделения и гидратации на стадии формирования структуры. Установлено, что величина вакуума 0,085–0,095 МПа создает условия для контролируемого роста газовых пузырьков, а рациональный температурный режим 39–43 °C обеспечивает необходимую скорость гидратации по закону Аррениуса.

Установлен характер влияния величины вакуума на процесс структурообразования ячеистого бетона, заключающийся в следующем. Изменение величины вакуума в диапазоне 0,055–0,095 МПа обеспечивает переход от кинетически затрудненного газовыделения к равномерному росту сферических пор. При этом величина вакуума >0,095 МПа приводит к коалесценции пор и критической усадке материала, тогда как величина вакуума менее 0,055 МПа не позволяет преодолеть энергетический барьер для стабильного порообразования.

Разработаны принципы управления фазовым составом ячеистобетонной смеси с использованием диаграммы агрегатных состояний, описывающей последовательность стадий структурообразования. На основе закона постоянства объемного фазового состава дисперсных систем formalизован процесс перехода от начального состояния системы через стадии воздухововлечения, термовакуумирования, гидратации цемента и твердения изделия, что позволяет количественно описывать изменение объемных концентраций фаз на каждом технологическом этапе.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о процессах формирования пористой структуры неавтоклавного ячеистого бетона при комплексном воздействии температуры и вакуума.

Развиты модельные представления о динамике расширения газовых пор в вязкоупругой среде на основе уравнения Рэлея-Плессета, адаптированного для ячеистобетонной смеси, и законов постоянства объемного фазового состава дисперсных систем.

Разработаны рациональные составы термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с использованием промышленных отходов (золы-уноса), обеспечивающие получение изделий марок по средней плотности

D400–D600 с улучшенными прочностными (1,8–4,4 МПа) и теплоизоляционными (0,068–0,108 Вт/(м·°C)) характеристиками.

Предложена технологическая схема производства изделий из термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения, особенностью которой является вакуумирование предварительно нагретой смеси.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой данной работы служили результаты как фундаментальных, так и прикладных работ отечественных и зарубежных ученых, посвященных разработке технологий производства ячеистых бетонов неавтоклавного твердения. Экспериментальные исследования охватывали изучение структуры и свойств ячеистых бетонов с использованием методов рентгеновской дифрактометрии, растровой электронной микроскопии, а также комплекса стандартизованных испытаний образцов. Все эксперименты проводились на высокотехнологичном сертифицированном оборудовании, что обеспечило необходимую точность и статистическую обоснованность полученных данных.

Положения, выносимые на защиту:

- научно-теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с однородной пористой структурой и с улучшенными физико-механическими характеристиками;
- влияние вакуумирования и температуры как факторов формирования пористой структуры ячеистого бетона на начальном этапе его твердения;
- принципы управления процессами всучивания поризованных смесей за счет термовакуумирования;
- изменения фазового состава твердеющей ячеистобетонной смеси в процессе поризации с учетом воздухововлечения и термовакуумирования смеси;
- закономерности влияния рецептурно-технологических факторов на физико-механические характеристики неавтоклавного ячеистого бетона и изделий повышенной эффективности на его основе;
- технологическое решение производства изделий из термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с оценкой его технико-экономической эффективности. Результаты апробации.

Степень достоверности результатов обеспечена: проведением обширного комплекса экспериментальных исследований, выполненных с применением разнообразных методик и современного сертифицированного высокотехнологичного оборудования в строгом соответствии с требованиями действующих нормативных документов и государственных стандартов Российской Федерации. Итоговые данные согласуются с общепринятыми научными положениями и не вступают в противоречие с выводами, представленными в трудах других исследователей. Проведенные эксперименты прошли апробацию как в лабораторных, так и в промышленных условиях.

Апробация научно-исследовательской работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: II–IV, VII, IX Международных научно-практических конференциях «Наука и инновации в строительстве» (Белгород, 2018–2020, 2023, 2025), XII Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2020), I Международной

научно-практической конференции: «Архитектура. Строительство. Информационные технологии – 2023» (Новороссийск, 2023), IX Международном студенческом строительном форуме (Белгород, 2024), VIII Международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (Алчевск, 2024).

Внедрение результатов исследования. Апробация полученных результатов в промышленных условиях осуществлялась на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (Белгород), где была выпущена партия блоков из термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения.

Результаты исследований апробированы в производственных условиях при строительстве индивидуального жилого дома в г. Старый Оскол Белгородской области. Имеется акт о внедрении результатов диссертационной работы на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (Белгород) по производству изделий из термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения.

Для практического использования результатов работы разработан стандарт организации СТО 02066339-049-2022 «Термовакуумированный ячеистый бетон неавтоклавного твердения. Технические условия» и Рекомендации по производству термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения.

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Строительство».

Публикации. Основные положения работы изложены в 19 публикациях, в том числе: 4 статьи в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 2 работы в издании, индексируемом в базах данных Scopus. Получен 1 патент на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Личный вклад состоит в непосредственном участии на всех этапах исследования – от получения, анализа и систематизации исходных теоретических данных до практической реализации поставленных задач. Автором разработаны и внедрены принципы получения термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения, основанные на созданных рецептурных и технологических решениях, выполнена подготовка и проведение комплекса экспериментальных работ, включая обработку, интерпретацию и оценку полученных результатов. Принято участие в апробации результатов работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Результаты изложены на 182 страницах машинописного текста, включающего 23 таблицы, 66 рисунков, список литературы из 175 источников, 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Развитие современного строительного материаловедения характеризуется внедрением инноваций, способствующих созданию высокопроизводительных, энергоэффективных и экологически чистых материалов с увеличенным сроком эксплуатации. Стратегические тенденции включают снижение негативного влияния промышленных производств на окружающую среду; повышение уровня эффективности технологических линий; использование техногенных отходов в

производстве бетонов. Особую значимость приобретают изделия из неавтоклавного ячеистого бетона, применяемые при возведении ограждающих конструкций зданий различного назначения.

В связи с этим **рабочей гипотезой исследования** стало предположение о том, что повышение физико-механических характеристик ячеистого бетона неавтоклавного твердения возможно за счет термовакуумирования смеси, содержащей минеральные заполнители и воздухововлекающие добавки, в процессе формирования пористой структуры.

Для подбора и получения рациональных составов термовакуумированных ячеистых бетонов неавтоклавного твердения использовались следующие сырьевые компоненты: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (ГОСТ 31108-2020); заполнители: золы-уноса Рефтинской ГРЭС и Гусиноозерской ГРЭС (ГОСТ 25818-2017, ГОСТ 24211-2008); воздухововлекающие добавки: Полипласт АЭРО 815 (ТУ 5745-090-58042865-2014), Аэропласт (ТУ 5745-030-58042865-2008), АЭРОМИКС (ТУ 5745-001-04230553-2016); вода (ГОСТ 23732-2011).

Для подтверждения рабочей гипотезы в части возможности повышения физико-механических характеристик за счет термовакуумирования смеси исследован синергетический эффект воздействия на ячеистобетонную смесь температуры и вакуума.

Избыточное давление является ключевым физическим фактором, определяющим поризацию ячеистобетонных смесей, что играет фундаментальную роль в структурообразовании технологий производства высокопоризованных композитов. Теоретической основой модели поризации и структурообразования ячеистобетонной смеси служит уравнение Рэлея-Плессета (1), описывающее динамику роста сферических газовых пузырьков, адаптированное к вязкоупругой ячеистобетонной смеси:

$$\rho_{cm} \left[R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right] = P_g - P_{izb} - P_{cm} - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu \dot{R}}{R} - \tau_0, \quad (1)$$

где ρ_{cm} – плотность смеси; R – радиус пузырька, который изменяется во времени; \dot{R} – первая производная радиуса по времени; \ddot{R} – вторая производная радиуса по времени; P_g – давление газа внутри пузырька, зависящее от свойств газа и условий среды; P_{izb} – избыточное давление над поризуемой смесью; $P_{cm} = \rho_{cm} g H$ – гидростатическое давление смеси, зависящее от ее плотности и высоты столба; τ_0 – предельное напряжение сдвига, характеризующее начальную прочность структуры; σ – коэффициент поверхностного натяжения смеси; μ – динамическая вязкость смеси.

Снижение внешнего давления за счет создания вакуума уменьшает противодавление, стимулирует рост газовых пузырьков за счет повышения степени перенасыщения газового раствора, что ведет к улучшению пористой структуры материала.

Кинетика процессов формирования пористой структуры (рис. 1) определяется балансом скоростей порообразования и структурообразования, при этом максимальная скорость выделения газа наблюдается в первые 5–8 мин процесса. Влияние величины вакуума на критическое давление вспучивания имеет нелинейный характер (рис. 2), характеризующееся зонами поризации.

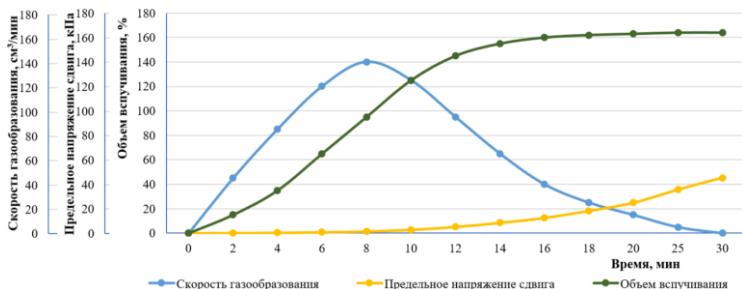


Рисунок 1 – Кинетика процессов формирования пористой структуры термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения

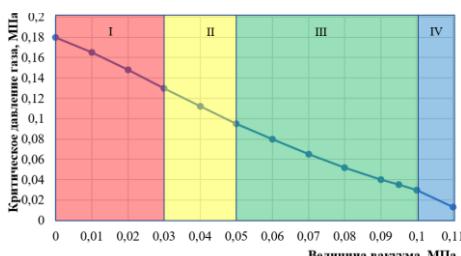


Рисунок 2 – Зависимость критического давления всучивания от величины вакуума при формировании пористой структуры ячеистого бетона: I – зона кинетического заторможения поризации; II – зона индукционного периода поризации; III – зона контролируемой поризации; IV – зона коалесценции пор и критической усадки

начинает активироваться процесс образования пор за счет преодоления энергетического барьера и начала дегазации, но вязкость смеси ограничивает интенсивность. Скорость порообразования постепенно увеличивается, аналогично индукционному периоду твердения цементных систем.

III зона (контролируемая поризация) в диапазоне величины вакуума 0,055–0,095 МПа характеризуется равномерным и устойчивым ростом сферических пор, согласованным с нарастанием прочности смеси. Такая поризация обеспечивает стабильную и однородную структуру без слияния пор.

IV зона (коалесценция и критическая усадка) наступает при величине вакуума выше 0,095 МПа, где чрезмерное порообразование приводит к слиянию пор, образованию крупных пустот, разрушению перегородок и усадке, в результате чего ухудшаются структура и прочность материала.

Установлено, что для получения качественной пористой структуры необходимо начать снижение внешнего давления через 2–4 мин после укладки смеси и поддерживать воздействие около 8–15 мин, одновременно контролируя изменения вязкости и других реологических характеристик смеси. Уменьшение давления способствует не только расширению пор, но и ускоряет процессы дегазации и гидратации в межпоровых перегородках, что повышает прочность материала.

Установлено, что I зона (кинетическое заторможение) характеризуется величиной вакуума менее 0,04 МПа, при котором давление недостаточно для стабильного роста пор. На данной стадии активируется лишь малая часть растворенного газа, при этом силы поверхностного натяжения и вязкостного сопротивления преобладают над расширением пор, что приводит к неполному всучиванию, высокой плотности и неоднородности структуры.

II зона (индукционный период) охватывает диапазон величины вакуума 0,04–0,055 МПа, при котором

Температурный фактор существенно влияет на формирование ячеистого бетона, оказывая нелинейное воздействие на скорость гидратации цемента, кинетику порообразования, набор прочности и капиллярную пористость смеси. Данный параметр является важным элементом технологии неавтоклавного твердения термовакуумированного ячеистого бетона, так как определяет развитие внутренней структуры материала и его физико-механические свойства.

Установлено, что скорость гидратации регулируется законом Аррениуса и достигает максимума при температуре 39–43 °С, что соответствует пику степени гидратации, интенсивности газообразования и темпа набора прочности (рис. 3). При обеспечении данного температурного режима достигается 97–100 % степени гидратации в течение первых суток, а скорость газообразования и прочностные показатели увеличиваются.

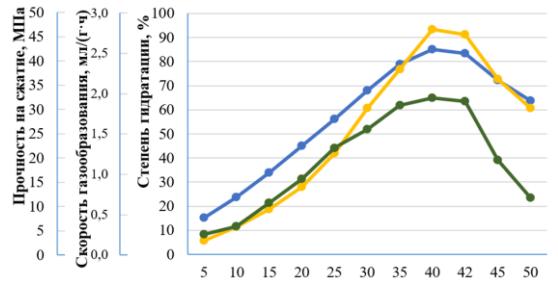


Рисунок 3 – Комплексная зависимость степени гидратации, скорости газообразования и темпа набора прочности неавтоклавного ячеистого бетона от температуры

Температура выше 45 °С вызывает замедление гидратации вследствие ускоренного испарения влаги и возникновения термических дефектов, повышается капиллярная пористость, что снижает качество материала. При температуре ниже 20 °С происходят значительные замедления гидратации и газовыделения, что приводит к удлинению сроков твердения и ухудшению структуры. Увеличение температуры сопряжено с сокращением расхода воды и уменьшением капиллярной пористости, однако при достижении 50 °С наблюдается рост остаточной пористости и структурных дефектов вследствие ускоренного твердения. В диапазоне 35–45 °С формируются наиболее плотные и непроницаемые межпоровые перегородки ячеистого бетона, минимизирующие риск усадочных трещин.

В целях комплексного анализа технологических факторов, влияющих на формирование пористой структуры и физико-механических свойств термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения, изучены свойства воздуховлекающих добавок, обеспечивающие повышение его функциональных свойств.

Поверхностное натяжение, как ключевой параметр действия воздуховлекающих добавок, варьируется для каждой добавки, что отражается в их способности снижать межфазное натяжение при высоком воздухосодержании (рис. 4, а). Установлено, что Полипласт АЭРО 815 характеризуется наибольшей поверхностной активностью с минимальным значением натяжения 33 мН/м при концентрации 0,1 моль/л.

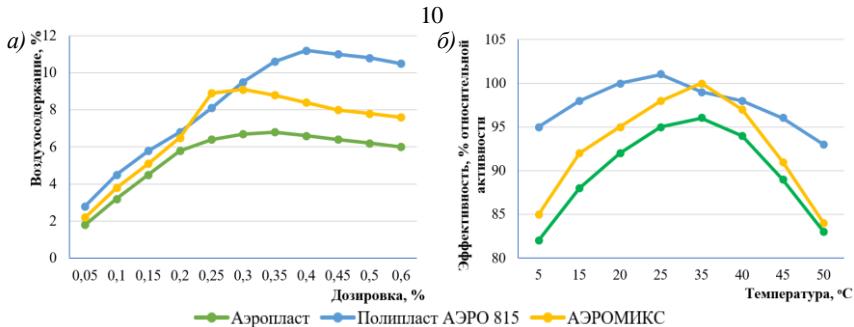


Рисунок 4 – Зависимость воздухосодержания от концентрации (а) и эффективность воздухововлекающих добавок (б) при термовакуумной обработке

Термостабильность добавок подтверждена в диапазоне 5–50 °С, где Полипласт АЭРО 815 сохраняет до 94–100 % активности, обеспечивая технологическую надежность процесса при термовакуумной обработке (рис. 4, б) с высокой стабильностью, что обусловило ее применение в дальнейших исследованиях.

В рамках исследования проведено моделирование процессов, протекающих на стадии формирования пористой структуры, для смеси термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения для определения рационального расхода исходных компонентов. Состав смеси приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав смеси термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения

Показатели	Компоненты смеси			
	Цемент	Зола-уноса Рефтинской ГРЭС	Полипласт АЭРО 815	Вода
Расход, кг на 1 м ³	270	190	0,7	160
Средняя плотность, кг/м ³	3150	2650	990	1000
Объемное содержание ингредиентов, л/м ³	87	93	0,19	160

Процессы, протекающие в ячеистобетонной смеси при формировании структуры ячеистого бетона, представлены на диаграмме агрегатных состояний (рис. 5), где на осях треугольника приведены объемные доли твердой (Т), жидкой (Ж) и газообразной (Г) фаз. Использование объемных концентраций фаз возможно при применении закона постоянства объемного фазового состава дисперсных систем, по которому, независимо от вида дисперсной системы или типа образующейся структуры, в любой момент времени сумма долей объемных концентраций твердой, жидкой и газовой фаз является величиной постоянной и равной единице:

$$K_{m1} + K_{ж1} + K_{e1} = K_{m2} + K_{ж2} + K_{e2} = \dots = K_{mn} + K_{жn} + K_{en} = 1, \quad (2)$$

где K_m , $K_{ж}$, K_e – объемное содержание твердой, жидкой и газообразной фаз в системе на соответствующей технологической стадии; n – число технологических стадий.

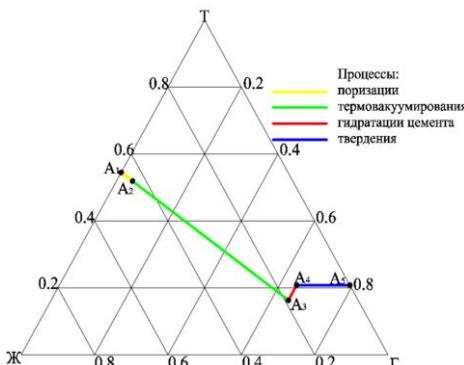


Рисунок 5 – Диаграмма агрегатных состояний для модельной смеси термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения: A_1A_2 – процесс воздухововлечения; A_2A_3 – процесс термовакуумирования; A_3A_4 – процесс гидратации цемента; A_4A_5 – твердение изделия

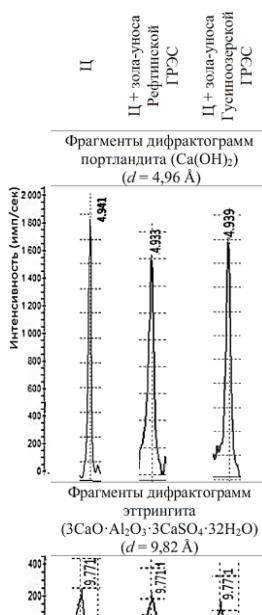


Рисунок 6 – Дифракционные профили отражений портландита и этtringита

Точка A_1 (рис. 5) отображает агрегатное соотношение фаз до порообразования в смеси и формирования первичной коагуляционной структуры. Координаты точки A_1 по Т:Ж:Г составляют [0,53; 0,47; 0,00].

Процесс формирования пористой структуры ячеистого бетона базируется на модельных представлениях о динамике расширяющейся газовой поры в жидкой фазе как единичной контрольной ячейки.

Модельные представления о динамике расширяющейся газовой поры в жидкости позволяют вести адекватный анализ экспериментальных наблюдений и данных для получения достаточно надежных качественных выводов и количественных оценок процессов, протекающих в ячеистобетонных смесях при формировании поровой структуры.

Проведено комплексное изучение процессов формирования структуры и фазового состава термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с учетом влияния минеральных заполнителей (золы-уноса Рефтинской и Гусиноозерской ГРЭС) и особенностей их взаимодействия с основными компонентами цементной матрицы.

Рентгенофазовый анализ (рис. 6) выявил снижение интенсивности отражений портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в составах с золами-уносом на 5–12 %. Гидросиликатный гель выступает в роли основного связующего вещества, а алюмосиликатные соединения золы участвуют в формировании структуры.

Микроструктурный анализ выявил, что золы-уноса действуют преимущественно как заполнитель (рис. 7, б, в), создавая плотную, равномерно упакованную матрицу с увеличением общей поверхности кристаллизации и улучшением распределения частиц.

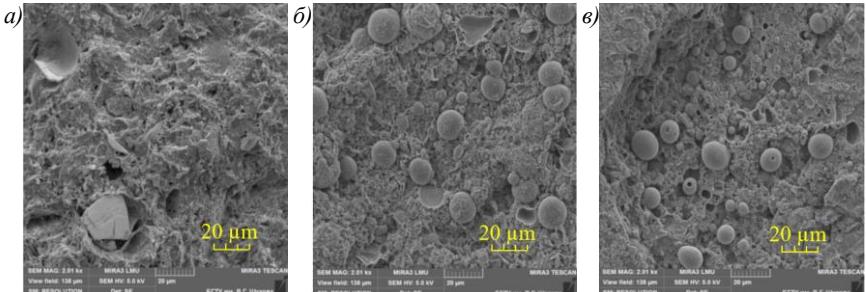


Рисунок 7 – Микроструктура цементного камня: а – без добавок; б – с золой-уноса Рефтинской ГРЭС; в – с золой-уноса Гусиноозерской ГРЭС

Для рационализации состава термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с применением в качестве заполнителя золы-уноса Гусиноозерской и Рефтинской ГРЭС использован метод математического планирования эксперимента с варьированием факторов: водотвердое отношение (X_1) в пределах от 0,35 до 0,45 с интервалом варьирования 0,05; расход воздухововлекающей добавки Полипласт Аэро 815, % от массы цемента (X_2) в пределах от 0 до 0,5 с интервалом варьирования 0,25; величина вакуума (X_3) от 0,075 до 0,095 МПа с интервалом варьирования 0,01. Факторы, не вошедшие в план эксперимента, приняты постоянными, в том числе температура формовочной смеси $t_{cm} = \text{const} = 41^\circ\text{C}$.

Для получения математических моделей, отражающих связь между выходными параметрами и основными факторами, проведена статистическая обработка экспериментальных данных. Получены экспериментально-статистические модели влияния управляющих факторов на свойства термовакуумированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС (3), (4):

$$\rho_{cp} = 591,68 - 53,9 \cdot X_1 - 91,1 \cdot X_2 - 134,4 \cdot X_3 + 38,32 \cdot X_1^2 + 50,32 \cdot X_2^2 + 31,82 \cdot X_3^2 + 10,38 \cdot X_1 \cdot X_2 + 15,38 \cdot X_1 \cdot X_3 + 17,88 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (3)$$

$$R_{cyc} = 4,28 - 0,12 \cdot X_1 - 0,68 \cdot X_2 - 1,14 \cdot X_3 - 0,07 \cdot X_1^2 - 0,17 \cdot X_2^2 - 0,17 \cdot X_3^2 + 0,03 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,03 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,18 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (4)$$

Получены экспериментально-статистические модели влияния управляющих факторов на свойства термовакуумированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Рефтинской ГРЭС (5), (6):

$$\rho_{cp} = 487 + 14,3 \cdot X_1 - 65,7 \cdot X_2 - 91,2 \cdot X_3 + 32,5 \cdot X_1^2 + 37,5 \cdot X_2^2 + 22 \cdot X_3^2 - 4,75 \cdot X_1 \cdot X_2 - 18,25 \cdot X_1 \cdot X_3 + 13,25 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (5)$$

$$R_{cyc} = 3,35 + 0,18 \cdot X_1 - 0,42 \cdot X_2 - 0,97 \cdot X_3 + 0,03 \cdot X_1^2 - 0,17 \cdot X_2^2 - 0,22 \cdot X_3^2 - 0,05 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,13 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (6)$$

По уравнениям регрессии, входящим в математическую модель, дан анализ влияния исследуемых факторов при прочих равных условиях на среднюю плотность и прочность на сжатие термовакуумированного

ячеистого бетона неавтоклавного твердения. Комплексное представление о влиянии водотвердого отношения (В/Т), расхода воздухововлекающей добавки и величины вакуума на выходные параметры ячеистого бетона с применением золы-уноса Гусиноозерской и Рефтинской ГРЭС отражено в графической интерпретации – номограммах зависимостей (рис. 8 и 9).

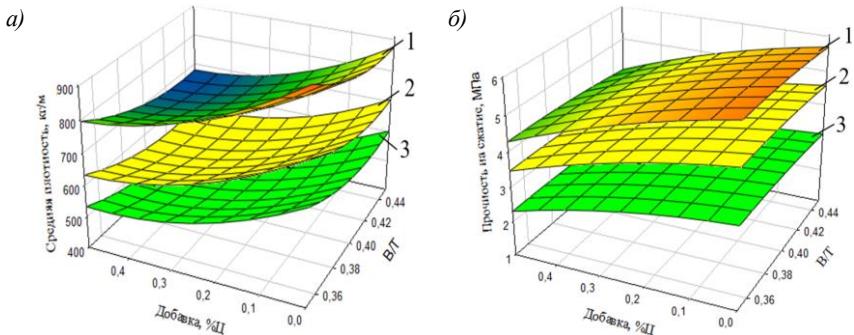


Рисунок 8 – Номограммы зависимостей средней плотности (а) и прочности на сжатие (б) термовакуумированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС от величины вакуума: 1 – 0,075 МПа; 2 – 0,085 МПа; 3 – 0,095 МПа

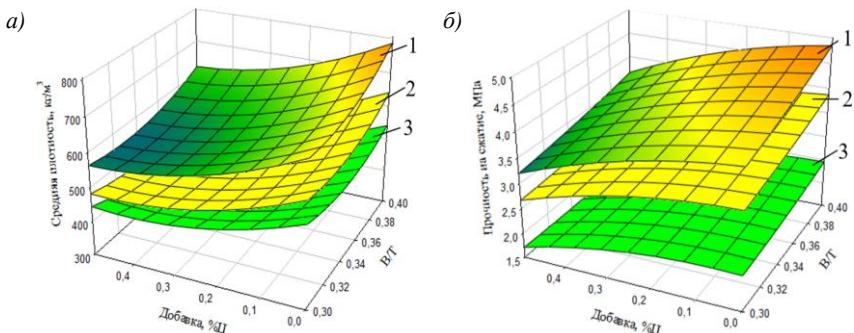


Рисунок 9 – Номограммы зависимостей средней плотности (а) и прочности на сжатие (б) термовакуумированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Рефтинской ГРЭС от величины вакуума: 1 – 0,075 МПа; 2 – 0,085 МПа; 3 – 0,095 МПа

Рационализация состава термовакуумированного ячеистого бетона, выполненная на основе экспериментально-статистических моделей влияния рецептурно-технологических факторов на физико-механические характеристики, позволила определить рациональные режимы формирования пористой структуры образцов, обеспечивающие высокие физико-механические характеристики ячеистых бетонов. По результатам исследований разработаны составы термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения и изучены изменения физико-механических характеристик в зависимости от процентного содержания сырьевых компонентов. Разработанные составы и

результаты комплексного анализа физико-механических свойств систематизированы в таблице 2.

Таблица 2 – Составы термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения и физико-механические характеристики изделий на их основе

№ состава	Цемент, кг/м ³	Зола-уноса Рефтинской ГРЭС, кг/м ³	Зола-уноса Гусиноозерской ГРЭС, кг/м ³	Полипласт Аэро 815, кг/м ³	Вода, л	В/Ц	Средняя плотность, кг/м ³	Марка по средней плотности	Прочность на сжатие, МПа	Класс по прочности	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	Марка по морозостойкости	Водопоглощение, %	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	Усадка, мм/м
1	270	120	-	0,6	155	0,57	398	D400	1,8	B1,5	0,068	F35	15	0,20	1,2
2	270	190	-	0,7	160	0,59	502	D500	3,6	B2,5	0,086	F50	14	0,17	1,0
3	300	-	160	0,8	165	0,55	497	D500	3,5	B2,5	0,092	F50	16	0,17	0,9
4	320	180	-	0,9	175	0,55	596	D600	4,4	B3,5	0,108	F75	12	0,13	0,9

Полученные результаты (табл. 2) подтверждают эффективность применения термовакуумирования для получения ячеистых бетонов марок по средней плотности D400–D600 с улучшенными прочностными (1,8–4,4 МПа) и теплоизоляционными (0,068–0,108 Вт/(м·°C)) характеристиками. Разработанные составы обеспечивают получение материала с заданным сочетанием прочности, теплоизоляционных характеристик и долговечности, что позволяет использовать его в различных условиях эксплуатации.

Микроструктурный анализ образцов термовакуумированных ячеистых бетонов неавтоклавного твердения (рис. 10) выявил корреляцию между рецептурой, характером гидратных фаз и структурными свойствами.

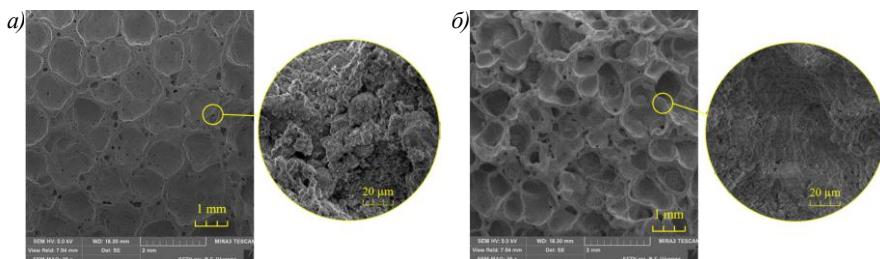


Рисунок 10 – Микроструктура образцов термовакуумированного ячеистого бетона марки по средней плотности D500: а – с золой-уносом Рефтинской ГРЭС; б – с золой-уносом Гусиноозерской ГРЭС

Образцы характеризуются равномерными замкнутыми пористыми структурами с тонкими перегородками из аморфного C-S-H геля и низкой капиллярной пористостью. С увеличением средней плотности образцов формируется иерархичная структура и растет доля мезопор, а уплотнение цементно-зольной матрицы обеспечивается за счет частиц золы-уноса как микрозаполнителя, способствующего механическому упрочнению межпоровых перегородок.

На основании проведенных исследований структурных характеристик образцов со средней плотностью 400–600 кг/м³ можно сделать вывод о том, что общая пористость материала варьируется в диапазоне 75,0–83,3 % (рис. 11), при этом ее структурная организация существенно зависит от состава исходной смеси.

Анализ распределения пор по размерам (рис. 12) показывает характерные особенности для каждой группы средней плотности.

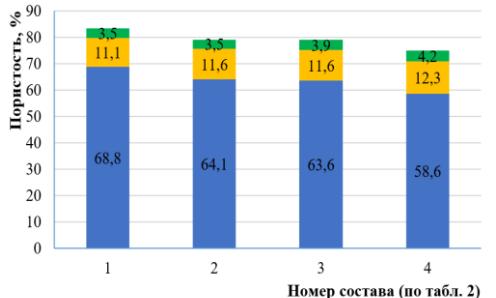


Рисунок 11 – Пористость термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения

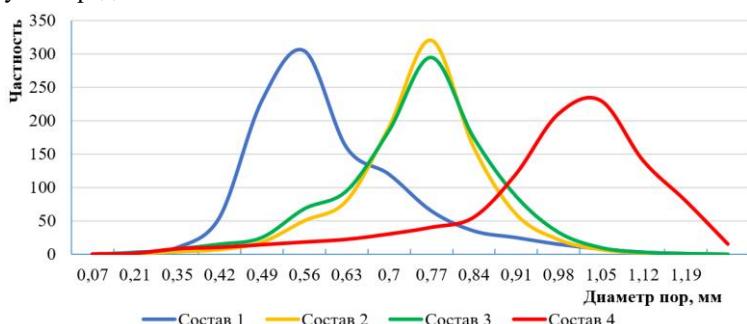


Рисунок 12 – Распределение пор по размерам для составов термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения различной средней плотности

Состав марки по средней плотности D400 (состав 1) характеризуется ярко выраженным максимумом при диаметрах пор 0,5–0,6 мм, что соответствует пику распределения макропор. Для составов марки по средней плотности D500 (составы 2 и 3) отмечается смещение максимумов к диаметрам пор 0,7–0,8 мм с более однородным распределением и увеличением доли пор среднего размера. Наиболее плотный состав с маркой по средней плотности D600 (состав 4) отличается концентрацией основного распределения размеров пор в области 0,95–1,1 мм, что обусловливает формирование сложной системы каналоподобных и сетчатых пор.

Предложена технологическая схема производства изделий из термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения (рис. 13).

Технологический процесс включает дозирование, смешивание в течение 50 с и нагрев смеси до температуры 39–43 °С с последующей укладкой смеси в предварительно разогретую до температуры 55 °С форму. Вспучивание смеси выполняется в течение 90 с за счет активности воздухововлекающей добавки. Затем форма накрывается вакуум-щитом, проводится вакуумирование (при величине вакуума 0,085–0,095 МПа) и одновременное воздействие удара снизу в течение 30 с, выдерживание смеси под вакуум-щитом в течение 2 ч с целью формирования стабильной пористой структуры.

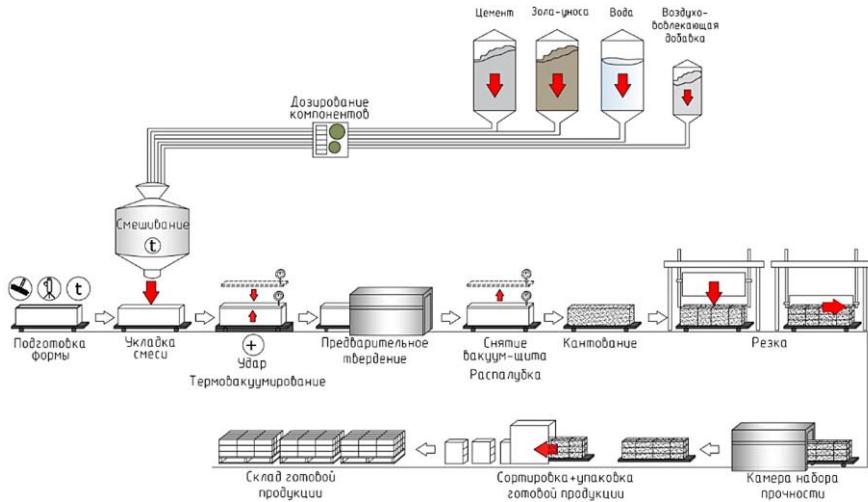


Рисунок 13 – Технологическая схема производства изделий из термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения

Разработаны стандарт организации (СТО 02066339-049-2022) и рекомендации по производству термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения. Обоснована технико-экономическая эффективность термовакуумирования поризованной смеси с применением воздуховолекающей добавки, обеспечивающая снижение себестоимости продукции до 43 % в зависимости от марки по средней плотности.

Результаты исследований апробированы в промышленных условиях на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ», где была выпущена партия блоков из термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения. Полученная партия блоков использовалась при выполнении кладки наружных стен при строительстве индивидуального жилого дома в г. Старый Оскол Белгородской области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Дополнены теоретические представления о процессах формирования пористой структуры неавтоклавного ячеистого бетона при комплексном воздействии температуры и вакуума.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с однородной пористой структурой и улучшенными физико-механическими характеристиками за счет совместного применения температурного фактора и вакуумирования для управления кинетикой газовыделения и гидратации на стадии формирования структуры. Установлено, что величина вакуума 0,085–0,095 МПа создает условия для контролируемого роста газовых пузырьков, а рациональный температурный режим 39–43 °C обеспечивает необходимую скорость гидратации по закону Аррениуса.

Установлен характер влияния величины вакуума на процесс структурообразования ячеистого бетона, заключающийся в следующем. Изменение величины вакуума в диапазоне 0,055–0,095 МПа обеспечивает переход от кинетически затрудненного газовыделения к равномерному росту сферических пор. При этом величина вакуума >0,095 МПа приводит к коалесценции пор и критической усадке материала, тогда как величина вакуума менее 0,055 МПа не позволяет преодолеть энергетический барьер для стабильного порообразования.

Разработаны принципы управления фазовым составом ячеистобетонной смеси с использованием диаграммы агрегатных состояний, описывающей последовательность стадий структурообразования. На основе закона постоянства объемного фазового состава дисперсных систем формализован процесс перехода от начального состояния системы через стадии воздухововлечения, термовакуумирования, гидратации цемента и твердения изделия, что позволяет количественно описывать изменение объемных концентраций фаз на каждом технологическом этапе.

Развиты модельные представления о динамике расширения газовых пор в вязкоупругой среде на основе уравнения Рэлея–Плессета, адаптированного для ячеистобетонной смеси, и законов постоянства объемного фазового состава дисперсных систем.

Разработаны рациональные составы термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с использованием промышленных отходов (золы-уноса), обеспечивающие получение изделий марок по средней плотности $D400$ – $D600$ с улучшенными прочностными (1,8–4,4 МПа) и теплоизоляционными (0,068–0,108 Вт/(м·°C)) характеристиками.

Предложена технологическая схема производства изделий из термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения, особенностью которой является вакуумирование предварительно нагретой смеси.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для внедрения в практику деятельности предприятий по производству изделий из ячеистого бетона неавтоклавного твердения, а также могут быть использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Строительство».

Перспективы дальнейших исследований: целесообразно рассматривать в направлении углубленного изучения явлений на поверхности раздела фаз при термовакуумном воздействии с различным типом ячеистобетонных смесей, включая составы с комплексным применением зол-уноса различного химико-минералогического состава и других техногенных заполнителей.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

*В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий,
рекомендованных ВАК РФ*

1. *Марущико, М. В.* Исследование влияния рецептурно-технологических факторов на физико-механические характеристики термовакуумированного ячеистого

бетона неавтоклавного твердения / М.В. Марушко, И.А. Погорелова, Л.А. Сулейманова // Вестник евразийской науки. – 2024 – Т. 16, № 6 – URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN624.pdf>. (К2).

2. *Сулейманова, Л.А.* Применение композиционных вяжущих в технологии ячеистого бетона / Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, **М.В. Марушко** // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 2. – С. 10-16.

3. *Сулейманова, Л.А.* Вибропакуумированные гипосодержащие композиты / Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, **М.В. Марушко**, Н.В. Огнев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 12. – С. 62-66.

4. *Сулейманова, Л.А.* Повышение эффективности производства и применения ячеистых бетонов / Л.А. Сулейманова, А.С. Коломацкий, И.А. Погорелова, **М.В. Марушко** // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 11. – С. 34-42.

В изданиях, индексируемых в базах данных Scopus

5. *Suleymanova, L.A.* Processing methods used to create high-quality porous structure of aerated concrete / L.A. Suleymanova, **M.V. Marushko**, A.S. Kolomatsky // Materials Science Forum. 2020. – Vol. 992. – P. 212-217. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.212. (Q4).

6. *Suleymanova, L.A.* Theoretical basis of formation highly organized porous structure of aerated concrete / L.A. Suleymanova, I.A. Pogorelova, **M.V. Marushko** // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 945. – P. 309-317. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.309. (Q4).

В сборниках конференций

7. *Марушко, М.В.* Влияние рецептурно-технологических факторов на физико-механические характеристики термовакуумированного неавтоклавного ячеистого бетона на основе гусиноозерской золы-уноса / М.В. Марушко, И.А. Погорелова, Л.А. Сулейманова // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. IX Международной научно-практической конференции. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2025. – С. 268-273.

8. *Марушко, М.В.* Термовакуумирование как способ поризации неавтоклавного ячеистого бетона / М.В. Марушко, И.А. Погорелова // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сб. тезисов докл. VIII Международной научно-технической конференции. – Алчевск: Донбасский государственный технический университет, 2024. – С. 396-398.

9. *Марушко, М.В.* Исследование зависимости средней плотности и прочности на сжатие термовакуумированного неавтоклавного ячеистого бетона от рецептурно-технологических факторов / М.В. Марушко // IX Международный студенческий строительный форум – 2024: сб. докл. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 364-368.

10. *Марушко, М.В.* Современное состояние производства и применения ячеистого бетона неавтоклавного твердения / М.В. Марушко, И.А. Погорелова, Л.А. Сулейманова // Университетская наука. – 2024. – № 2(18). – С. 41-46.

11. *Suleymanova, L.A.* Thermally insulated cellular geopolymers / L.A. Suleymanova, **M.V. Marushko**, I.S. Ryabchevskiy, I.A. Pogorelova // AIP Conference Proceedings. –

2023. – Vol. 2758. – P. 58-62. – DOI: 10.1063/5.0129452.

12. **Марушко, М.В.** Структура неавтоклавного ячеистого бетона на основе дисперсных систем / М.В. Марушко, И.А. Погорелова, Л.А. Сулейманова // Архитектура. Строительство. Информационные технологии – 2023 (АСИТ-2023): труды I Международной научно-практической конференции. – Новороссийск: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 23-26.

13 **Сулейманова, Л.А.** Формирование структуры термовакуумированного ячеистого бетона на основе дисперсных систем / Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, **М.В. Марушко** // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. VII Международной научно-практической конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – Т. 2. – С. 229-234.

14. **Амелин, П.А** Методики пространственного моделирования поробетона / П.А. Амелин, **М.В. Марушко**, И.С. Рябчевский // XII Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство»: материалы форума. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 715-724.

15. **Сулейманова, Л.А.** Оценка водостойкости основных строительных материалов для стеновых ограждений / Л.А. Сулейманова, П.А. Амелин, **М.В. Марушко**, К.А. Сулейманов // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. IV Международной научно-практической конференции. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 397-403.

16. **Сулейманова, Л.А.** Оптимизация формирования структур в технологии газобетона на основе дисперсных систем / Л.А. Сулейманова, **М.В. Марушко** // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. III Международной научно-практической конференции к 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 341-347.

17. **Марушко, М.В.** Вибропакуумированные пористые композиты / М.В. Марушко, Л.А. Сулейманова, В.А. Белогуров // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. Международной научно-практической конференции (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова). – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 405-408.

Объекты интеллектуальной собственности

18. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680208.** Программа моделирования изменения фазового состава термовакуумированных ячеистых геополимербетонов неавтоклавного твердения // Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, **М.В. Марушко**, И.С. Рябчевский, М.А. Богачева. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Опубл. 28.10.22.

19. **Пат. RU 2750535.** Способ изготовления ячеистобетонных изделий // **М.В. Марушко**, Л.А. Сулейманова, И.С. Рябчевский, И.А. Погорелова. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Опубл. 29.06.2021.

МАРУШКО МИХАИЛ ВИКТОРОВИЧ

**ТЕРМОВАКУУМИРОВАННЫЙ ЯЧЕИСТЫЙ БЕТОН
НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Подписано в печать 17.10.2025.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,12. Тираж 100 экз. Заказ № 127.

Отпечатано в Белгородском государственном
технологическом университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46